

積層記録層を有するグラニューラ系垂直記録媒体の研究

著者	稲葉 祐樹
号	51
学位授与番号	3773
URL	http://hdl.handle.net/10097/37441

氏名	稲葉 祐樹	いな ば ゆう き
授与学位	博士(工学)	
学位授与年月日	平成19年3月27日	
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻	
学位論文題目	積層記録層を有するグラニューラ系垂直記録媒体の研究	
指導教員	東北大学教授 村岡 裕明	
論文審査委員	主査 東北大学教授 村岡 裕明	東北大学教授 高橋 研
	東北大学教授 佐橋 政司	東北大学助教授 島津 武仁

論文内容要旨

微細な結晶粒の集合体から成るグラニューラ系垂直記録媒体では、高密度化には飽和記録特性と熱安定性の両立、および結晶粒の微細化が必要である。本論文ではこれらの条件を満たすために、磁氣的にハードな層とソフトな層から成る粒子によって構成された Hard/Soft スタック媒体を提案した。私が研究を始めたのと同じ年に、ソフト層の膜厚を厚くし、さらにハード層との界面の結合力を低減して粒子内部に特殊なインコヒーレントな反転を誘起すると、熱安定性を維持しつつ、大きくスイッチング磁界を下げられるという報告がシミュレーションによってなされた。しかしながらスタック媒体において最適な磁化反転機構は、ソフト層やハード層に用いる材料の交換定数や膜厚、異方性、界面の結合力などに依存すると考えられる。まずは薄いソフト層を有するスタック媒体について、グラニューラ構造の実現と諸特性について明らかにしていく。次に、実際に界面の結合力を低減させてインコヒーレントな反転を導入した媒体を作成し、さらなる高密度化ポテンシャルを明らかにしていくことを目的として研究を進めた。

まず、実際にハード層に CoPtCr-SiO_2 を 10 nm 用い、ソフト層には膜厚の薄い (~ 3 nm) NiFe-SiO_2 や Co-SiO_2 を用いてスタック媒体を試作した。その結果、Fig.1 に示すように粒界に綺麗に SiO_2 が析出した、グラニューラ構造を有するスタック媒体の作成に成功した。しかしなが

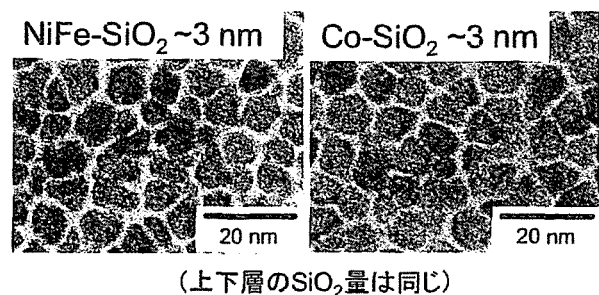


Fig. 1 ソフト層を 3 nm スタックした媒体の平面 TEM 像

らソフト層膜厚を 10 nm 程度に厚くしてしまうと結晶粒の磁気的な分離度が劣化してしまうため、実際に記録媒体に適用するためにはソフト層の厚みは 5 nm 以下と薄く用いることが重要であることが明らかとなった。このように薄いソフト層を有するスタック媒体の磁気特性について調べた結果、残留保磁力の角度依存性が 45 度で極小となっており、コヒーレントに磁化が回転する磁化機構となっていた。Fig.2 にはソフト層に種々の M_s を有する材料を用いて作成したスタック

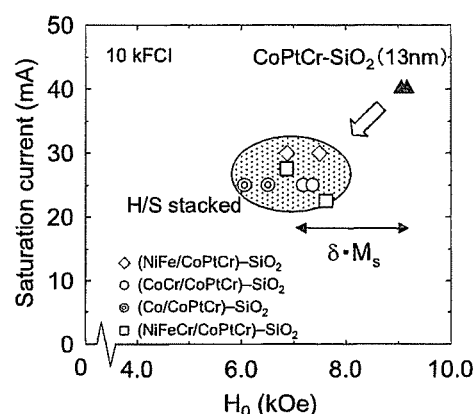


Fig. 2 種々の M_s のソフト層を有するスタック媒体の書き込み時の保磁力に対する飽和電流の変化

媒体について、低記録密度時の入出力特性が飽和する際の電流値を、書き込み時の保磁力に対して示す。図から、 M_s の大きなソフト層ほどゼーマン項の寄与によりスイッチング磁界を効果的に低減できることが明らかとなり、このスイッチング磁界の低下を受け、記録電流はソフト層を付与しない場合に比べて、約 40% 減少しており、媒体が書き込みやすくなっていた。

次に、膜厚が薄く、高い M_s のソフト層を用いたスタック媒体の持つポテンシャルを把握するべく、1 つめは記録分解能を高めるという観点から、もう 1 つは飽和記録特性と熱安定性の両立という 2 つの観点から理論的に媒体設計を行った。ここでは、はじめに高記録分解能化について理論的に考察した結果を述べた後、実際に媒体を作成して実験した結果について述べていくことにする。

スタック媒体において、ソフト層の M_s をハード層に対して大きくすると、 M_s の差に起因する磁極が界面で発生し、この磁極によりソフト層内部には大きな反磁界が作用すると考えられる。垂直媒体においては、磁化曲線の傾きは局所的な磁化反転単位内の反磁界によって定まることが理論的にも実験的にも明らかにされている。このことから、膜厚が薄く、 M_s の高いソフト層を用いることで、粒間の交換相互作用を増加させることなく磁化曲線の傾きを大きくすることができると期待される。これは、ノイズを増加させることなく、磁化曲線の傾きを大きくすることで高記録分解能化が期待できることを意味している。

この考察を踏まえ、これまで用いていた NiFe-SiO₂ ソフト層に、Co や Cr を添加していくことで、実際にソフト層の M_s を変化させたスタック媒体を作成した。実験で用いたハード層の M_s は 400 emu/cm³ 程度であり、ソフト層の M_s はハード層と同程度から、約 1000 emu/cm³ 程度まで、広範囲に変化させた。ハード層の膜厚は 9 nm とし、ソフト層の膜厚は 3 nm とした。その結果、ソフト層の M_s が大きくなるほどゼーマン項の寄与によって残留保磁力は単調に低下し、この結果はエネルギー計算の結果とも

良く一致していた。一方磁化曲線の傾きは理論的な予測どおり増加していた。これらの媒体の記録分解能について検討した結果、Fig.3 に示すように記録分解能の指標である D_{50} はソフト層の M_s を増加させていくことで、最大 70 kFCI 向上していた。このことは磁化曲線の傾きの増加に伴い D_{50} が増加していることを示しており、期待した通りの結果を得ることができていた。一方この時 SN_mR は劣化せず、ソフト層の M_s の増加によりわずかに改善していた。なお今回は全ての M_s の範囲で -40 dB 以下のオーバーライト

がとれるように、ハード層とソフト層の M_s を合わせた状態での磁化曲線の傾きを高めに設定しているため、 D_{50} の変化率が小さくなっていたが、実際の効果はさらに大きいと考えている。また、詳しくは後述するが、ここで述べた薄いソフト層の M_s を高くする効果は、ソフト層とハード層の界面の結合力を低減した場合にも同様に表れていた。

ソフト層の付与によりスイッチング磁界が低減することが明らかとなったが、媒体の高密度化には熱安定性と飽和記録特性の両立も重要である。続いては、界面の交換結合力を低減して粒子内部にインコヒーレントな反転を誘起した場合について、理論、実験の両面から検討していく。

はじめに、薄い高 M_s ソフト層を有し、界面の結合力を低減させたスタック媒体の持つポテンシャルを把握するべく、ソフト層とハード層の界面の結合力を導入したモデルを仮定して磁気エネルギー計算を行った。今回は記録時のスイッチング磁界および残留磁化状態、すなわち反磁界がかかった状態でのエネルギーポテンシャルをそれぞれ求め、飽和記録特性と熱安定性を両立するために必要な物性値を求めた。その結果、充填率を考慮した M_s で Co-SiO₂ に相当する材料を用いると、10 nm のハード層に 2 nm という薄い膜厚のソフト層付与した場合でも、飽和記録特性と熱安定性を両立したまま粒子の体積をハード層のみの場合に比べて 1/3 にまで低減可能であることがわかった。これは、スタック媒体が現行の媒体に対し、面記録密度で約 3 倍、線記録密度では約 1.7 倍に高められるポテンシャルを有していることを意味している。

この結果を踏まえ、実際に界面の結合力を低減させた媒体を作成した。ハード層の膜厚は 9 nm、ソフト層の膜厚は高記録分解能化の観点から、 M_s の大きな Co-SiO₂ を 2 nm と薄く用いている。さらに、両者の間に Pt-SiO₂ や NiFeCr-SiO₂ を interlayer として挿入し、その膜厚を変化させることで界面の交換結合力を制御した。

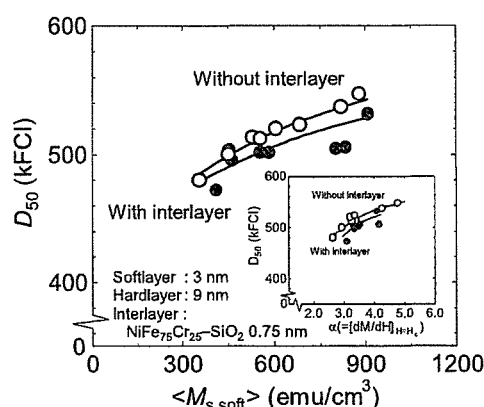


Fig. 3 D_{50} のソフト層 M_s 依存性

ハード層にソフト層を直接結合させた場合には、媒体の残留保磁力は 30%低減していた。そこへ interlayer を挿入していくと、1.5 nm の時に残留保磁力が極小となっていた。さらに厚く 2.0 nm とすると、磁界を印加した状態でソフト層のみが可逆的に反転をする状態になり、3.0 nm の時にはソフト層は非可逆的に反転し、磁氣的に分離した構造となっていた。このような界面の結合力の強さに応じた磁化機構の変化は理論的な予測と良く一致していた。

Fig.4 には、interlayer の膜厚に対する残留保磁力の変化

率をまとめた。図に示すように、interlayer の材料によらず残留保磁力の最大低減率は約 20%となっており、これはハード層のみに比較すると 43%もの低減率に達する。

このように界面の交換結合力を低減した効果について、記録再生特性の上から検討を加えた。まず書き込み能力について見てみると、今回用いたハード層は保磁力が非常に大きく、オーバーライトも -25 dB 程度と、飽和記録が非常に困難となっていた。そのハード層に 2 nm の Co-SiO₂ ソフト層を付与することでオーバーライトが -40 dB 以下となり、飽和記録が可能になっていた。さらに界面の交換結合力を低減することで、小さな記録電流でも十分なオーバーライト特性が得られ、書き込み能力は効果的に改善できていた。また、スタック媒体は 600 kFCI 前後の高い記録分解能を示していた。これは、薄い高 M_s ソフト層を用いて高記録分解能化が実現できたためであると考えられる。Fig.5 には SN_mR の線記録密度依存性を示した。スタック媒体では SN_mR のゼロクロス点が 800 kFCI となっており、高線記録密度まで良好な値となっていた。この結果は界面の結合力を低減しても同様に表れていた。

最後に保磁力の測定温度依存性を測定することで媒体の熱安定性を評価した。その結果、界面の結合力を低減しても温度に対する保磁力の変化率は変わらず、熱安定性は劣化していないことが明らかとなった。以上から本論文を通じて、薄い高 M_s ソフト層を用いた Hard/Soft スタック媒体は、信号品質と熱安定性を劣化させることなく飽和記録特性を向上し、高密度媒体としてのポテンシャルを有した媒体であることを実験的に明らかにした。

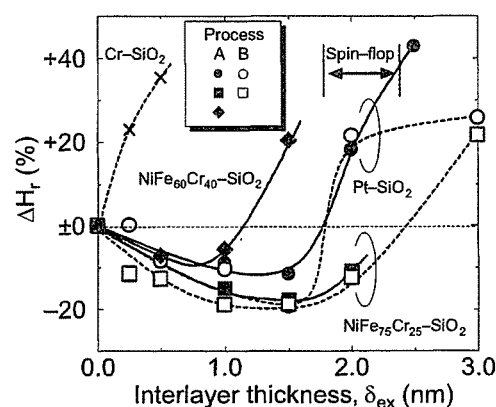


Fig. 4 残留保磁力の変化率の interlayer 膜厚依存性

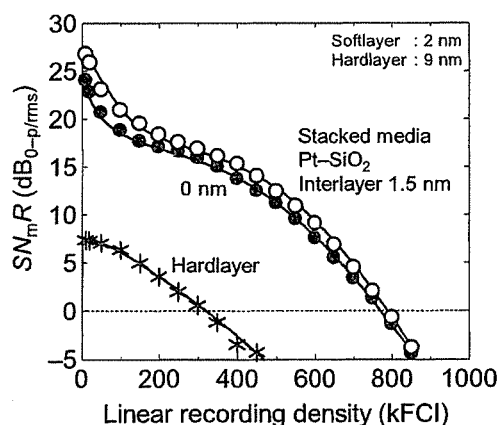


Fig. 5 SN_mR の線記録密度依存性

論文審査結果の要旨

ハードディスク装置の高密度化の要求は年毎に強くなっている。垂直磁気記録方式はこれに応えるものであるが、記録ビットの熱磁気安定性を保持しながら優れた高密度記録性能を満たす記録媒体が求められている。著者は、記録層を構成する磁性微粒子に軟磁性体と硬磁性体の積層構造を導入した新たな垂直磁気記録媒体について、磁気特性と記録特性に関する理論的及び実験的な検討を行い高密度磁気記録媒体としての可能性を明らかにした。本論文はその成果を取り纏めたもので、全編7章から成る。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、記録層を硬磁性体と軟磁性体で積層化した垂直磁気記録媒体の作製方法と磁気特性及び微細構造について述べている。硬磁性体に CoPtCr-SiO_2 、軟磁性体に Co-SiO_2 あるいは NiFe-SiO_2 を用いて実際に粒子構造を持つ積層膜を実現している。それまで理論検討だけにとどまっていた積層構造記録層を実際の垂直磁気記録媒体として作製したことは実用上有益な成果である。

第3章では、硬磁性体と軟磁性体が任意の界面交換結合を介して積層された磁性微粒子において、解析的な計算によって各層の磁気スピンの任意の角度で反転する際の磁気エネルギーを詳細に求めている。さらに、この磁気エネルギー計算から反転磁界と磁気バリアエネルギーの最適値を見出して、従来媒体に対する積層構造媒体の利点を定量的に示している。これは磁気記録媒体の設計論において有用な成果である。

第4章では、実際に記録再生可能な磁気ディスクとして積層記録層垂直磁気記録媒体を作製し、その記録再生特性を解析した結果を述べている。特に、軟磁性体の飽和磁化が大きいほど記録層全体の磁化曲線の傾斜が大きくなることで記録分解能が向上することを見出している。これはこの積層記録層媒体の記録性能に関して新たに得られた知見である。

第5章では、積層記録層の界面交換結合の効果を実験的に調べて最適化が可能であることを示している。硬磁性体と軟磁性体の界面に Pt-SiO_2 などを堆積して、その膜厚を変えることで交換結合を制御した記録媒体の磁気特性と記録特性を測定している。界面層の厚さを 2 nm にして交換結合を最適化することで反転磁界を効果的に低減できる一方、界面層が厚過ぎると独立した2つの磁化反転挙動を起こすことを明らかにしている。また、最適化した磁気ディスク媒体では D_{50} 値 630 kFCI という高い線記録密度が達成できることを実験的に確かめている。これは次世代高密度磁気記録媒体の開発において有用な成果である。

第6章では、この積層垂直記録媒体をさらに高密度化するための議論を行い、硬磁性体と軟磁性体の界面の平坦性と均一性を改良することで記録密度の向上が見込めることを示している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、硬磁性体と軟磁性体を適切な界面交換結合を介して積層した新たな記録層構造をもつグラニューラ系垂直磁気記録媒体を理論的に検討した上で実際に試作しその優れた磁気特性と記録特性を実証したもので、電子工学並びに磁気記録工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。